

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-121855

(43)Date of publication of application : 30.04.1999

(51)Int.Cl.

H01S 3/16

C30B 15/04

H01S 3/06

(21)Application number : 09-279275

(71)Applicant : NEC CORP

(22)Date of filing : 14.10.1997

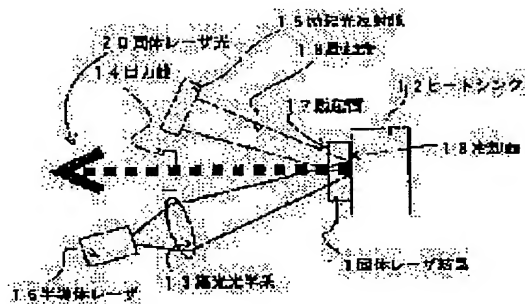
(72)Inventor : SAITO TAKASHI

## (54) SOLID-STATE LASER CRYSTAL, ITS FORMING METHOD AND SOLID-STATE LASER DEVICE

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a solid-state laser device which is capable of restraining a thermal distortion attendant on an enhancement in output power and emitting a laser beam of high quality and a method of forming a solid-state laser crystal used therefor.

SOLUTION: A solid-state laser device is equipped with a semiconductor laser 16 which excites a solid-state laser crystal 11, a condensing optical system 13 and an exciting light reflecting mirror 15 used for concentrating an exciting light 19 on the solid-state laser crystal 11, a heat sink 12 which cools down the solid-state layer crystal 11, and an output mirror 14 which is used for extracting a solid-state laser rays 20. A nonreflectoin coating and a high reflection coating to the wavelengths of the exciting light 19 and the solid-state laser rays 20 are each provided in the exciting plane 17 and cooling plane 18 of the solid-state laser crystal 11. Laser active ion concentration inside the solid-state laser crystal 11 is kept low at the exciting plane 17 and high at the cooling plane 18 to have a rectilinear gradient.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 14.10.1997

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3266071

[Date of registration] 11.01.2002

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

BEST AVAILABLE COPY

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

H 0 1 S 3/16

H 0 1 S 3/16

C 3 0 B 15/04

C 3 0 B 15/04

H 0 1 S 3/06

H 0 1 S 3/06

審査請求 有 請求項の数25 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号

特願平9-279275

(22) 出願日

平成9年(1997)10月14日

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 斎藤 隆志

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

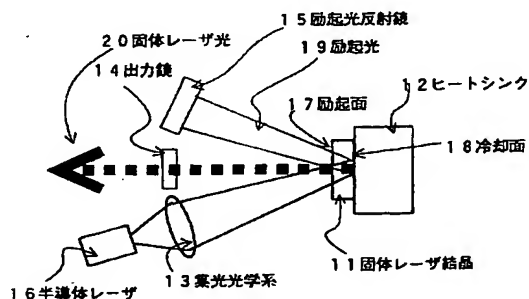
(74) 代理人 弁理士 京本 直樹 (外2名)

(54) 【発明の名称】 固体レーザー結晶とその作成方法及び固体レーザー装置

(57) 【要約】

【課題】 高出力化に伴う熱ひずみを抑制し、高品質なビームを取り出すことができる固体レーザー装置及びこれに用いる固体レーザー結晶の作成方法を提供する。

【解決手段】 固体レーザー装置は、固体レーザー結晶11を励起するための半導体レーザー16、励起光19を固体レーザー結晶11に集光するための集光光学系13及び励起光反射鏡15、固体レーザー結晶11を冷却するヒートシンク12、固体レーザー光20を取り出すための出力鏡14を有している。固体レーザー結晶11の励起面17及び冷却面18には、それぞれ、励起光19及び固体レーザー光14の波長に対して無反射コート、及び高反射コートが施されている。固体レーザー結晶中11のレーザー活性イオン濃度は、励起面17で低く、冷却面18で高くなる直線的な勾配を持つ。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 レーザ活性イオンを有するディスク形状の固体レーザ結晶において、前記固体レーザ結晶の結晶軸方向に前記レーザ活性イオンのドーブ濃度分布が変化していることを特徴とする固体レーザ結晶。

【請求項 2】 レーザ活性イオンを有するディスク形状の固体レーザ結晶において、前記固体レーザ結晶の励起面となる端面から冷却面となる端面に向かって前記レーザ活性イオンのドーブ濃度分布が連続的又は段階的に増加していることを特徴とする固体レーザ結晶。

【請求項 3】 前記ドーブ濃度分布の連続的な変化が直線又は曲線であることを特徴とする請求項 2 記載の固体レーザ結晶。

【請求項 4】 前記ドーブ濃度分布の段階的な変化が直線又は曲線であることを特徴とする請求項 2 記載の固体レーザ結晶。

【請求項 5】 レーザ活性イオンを有するディスク形状の固体レーザ結晶において、励起面から冷却面までの厚さ方向の距離を 1 とした場合に、レーザ活性イオンの濃度が前記固体レーザ結晶の励起面となる端面から冷却面となる端面に向かって、距離の 2 乗に比例して増加する勾配を持つことを特徴とする固体レーザ結晶。

【請求項 6】 前記ドーブ濃度分布の段階的な変化がレーザ活性イオンのドーブ濃度が異なる複数個の結晶を接合により形成されていることを特徴とする請求項 2 又は 4 記載の固体レーザ結晶。

【請求項 7】 前記濃度の異なる複数個の結晶がオプティカルコンタクトあるいは拡散接合により接合されていることを特徴とする請求項 6 記載の固体レーザ結晶。

【請求項 8】 前記固体レーザ結晶の励起面に固体レーザ光及び励起光に対して、光学的に透明な材質を接合したことを特徴とする請求項 1、2、3、4、5、6 又は 7 記載の固体レーザ結晶。

【請求項 9】 前記レーザ活性イオンは Nb 又は Yb であることを特徴とする請求項 8 記載の固体レーザ結晶。

【請求項 10】 固体レーザ結晶の材料粉末を加熱し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げる固体レーザ結晶の作成方法であって、回転引き上げとともに材料溶液を攪拌手段により攪拌し、レーザ活性イオン濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザ結晶の作成方法。

【請求項 11】 固体レーザ結晶の材料粉末を加熱する手段を有し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げる固体レーザ結晶製造装置であって、材料溶液を攪拌する手段を備え、攪拌によりレーザ活性イオン濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザ結晶の製造装置。

【請求項 12】 固体レーザ結晶の材料粉末を加熱し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転さ

せながら結晶を引き上げる固体レーザ結晶の作成方法であって、レーザ活性イオンの濃度の異なる複数個の材料溶液に対し、レーザ活性化イオンの濃度の順に種結晶をつけ、レーザ活性イオンの濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザ結晶の作成方法。

【請求項 13】 固体レーザ結晶の材料粉末を加熱する手段を有し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げる固体レーザ結晶の製造装置であって、レーザ活性イオンの濃度の異なる複数個の材料溶液を有し、レーザ活性イオンの濃度の順に種結晶をつける手段を有することを特徴とする固体レーザ結晶の製造装置。

【請求項 14】 固体レーザ結晶の材料粉末を加熱し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げて固体レーザ結晶を作成する方法であって、前記材料溶液中のレーザ活性イオン濃度を時間とともに増加させ、レーザ活性イオンの濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザ結晶の作成方法。

【請求項 15】 固体レーザ結晶の材料粉末を加熱する手段を有し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げて固体レーザ結晶を作成する製造装置であって、前記材料溶液中のレーザ活性イオンを時間とともに増加させる手段を有し、レーザ活性イオンの濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザ結晶の製造装置。

【請求項 16】 レーザ活性イオンの濃度が均一な固体レーザ結晶の周囲の一部を加熱手段により溶融し、前記加熱手段により固体レーザ結晶周囲を軸方向に沿って一方から他方へ複数回移動させることにより、レーザ活性イオンの濃度を結晶の軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザ結晶の作成方法。

【請求項 17】 レーザ活性イオンの濃度が均一な固体レーザ結晶の周囲の一部を溶融するための加熱手段と、前記加熱手段と前記固体レーザ結晶との相対位置を固体レーザ結晶の結晶軸方向に沿って一方から他方へ移動させる手段を有し、前記加熱手段により固体レーザ結晶の周囲を溶融させ、かつ、一方から他方へ複数回移動させることにより、レーザ活性イオン濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザ結晶の製造装置。

【請求項 18】 溶融した固体レーザ溶液から結晶を成長させる固体種結晶に接合されレーザ活性イオンの濃度が結晶軸方向に勾配を持つ固体レーザ結晶材料の粉末焼結体の一部を加熱手段により部分的に溶融させて、レーザ活性イオン濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザ結晶の作成方法。

【請求項 19】 溶融した固体レーザ溶液から結晶を成長させるための固体種結晶と、前記固体種結晶に結合されレーザ活性イオンの濃度が結晶軸方向に勾配を持つレー

ザ結晶材料の粉末焼結体と、前記粉末焼結体の一部を溶融するための加熱手段とを有し、前記粉末焼結体を前記加熱手段により部分的に溶融させて、レーザ活性イオン濃度が結晶の軸方向に沿って勾配した固体レーザ結晶を作成することを特徴とする固体レーザ結晶の製造装置。

【請求項20】励起光源としての半導体レーザと、ディスク形状の固体レーザ結晶と、前記固体レーザ結晶の一方の端面である励起面より前記半導体レーザ光を入射して発生した光を共振させる共振器と、前記固体レーザ結晶の他方の端面である冷却面に冷却手段を備えた固体レーザ装置において、前記固体レーザ結晶内のレーザ活性イオンのドーブ濃度が、励起面から冷却面へ増加する勾配を有する固体レーザ結晶を用いたことを特徴とする固体レーザ装置。

【請求項21】レーザ活性イオンのドーブ濃度が励起面から冷却面へ増加する濃度勾配が連続的であり、直線状または曲線状であることを特徴とする請求項20記載の固体レーザ装置。

【請求項22】励起面から冷却面までの厚さ方向の距離を1とした場合に、レーザ活性イオンの濃度が前記固体レーザ結晶の励起面となる端面から冷却面となる端面に向かって、距離の2乗に比例して増加する勾配を持つ固体レーザ結晶を用いたことを特徴とする請求項20記載の固体レーザ装置。

【請求項23】励起光源としての半導体レーザと、ディスク形状の固体レーザ結晶と、前記固体レーザ結晶の一方の端面である励起面より前記半導体レーザ光を入射して発生した光を共振させる共振器と、前記固体レーザ結晶の他方の端面である冷却面に冷却手段を備えた固体レーザ装置において、レーザ活性イオンのドーブ濃度が異なる複数個の結晶を前記ドーブ濃度が励起面から冷却面へ増加する勾配となるように接合した固体レーザ結晶を用い、前記ドーブ濃度の高い結晶面に前記冷却手段を接触させていることを特徴とする固体レーザ装置。

【請求項24】前記濃度の異なる複数個の結晶がオプティカルコンタクトあるいは拡散接合により接合されたことを特徴とする請求項23記載の固体レーザ装置。

【請求項25】固体レーザ光及び励起光に対して、光学的に透明な材質を固体レーザ結晶の励起面に接合したことを特徴とする請求項20、21、22、23又は24記載の固体レーザ装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体レーザを励起源とする固体レーザ装置に関し、固体レーザ結晶とこれを用いた固体レーザ装置及び固体レーザ結晶の作成方法及びその製造装置に関する。

【0002】

【従来の技術】近年の高出力半導体レーザの技術進歩により、従来の放電ランプ励起に変わる半導体レーザ励起

固体レーザの開発が活発化している。半導体レーザ励起は、放電ランプ励起に比べて、高効率、高ビーム品質、小型、長寿命などの特徴を有する。半導体レーザ励起固体レーザの高出力化は、基本的には、入力する半導体レーザ光の強度の増加によって達成できる。しかしながら、高出力化と高ビーム品質は、トレードオフの関係にあり、入力する半導体レーザ光を増加させるにつれて、結晶内の温度上昇に伴う屈折率分布及び熱ひずみの増加により、ビーム品質が劣化するという問題が生じる。

10 【0003】これを解決する1つの方策として、薄いディスク型レーザ結晶を端面励起し、裏面より端面冷却するアクティブミラー方式が提案されている。アクティブミラー方式の半導体レーザ励起固体レーザについては、例えば「レーザ研究、第24巻、59頁から65頁」に詳細に記述されている。

【0004】図24は、従来の固体レーザ装置の一例を示す図である。固体レーザ結晶11は、直径6mm、厚さ2mmのディスク形状であり、イットリウム・アルミニウム・ガーネット(YAG)の母材に、1.4atm %の濃度でレーザ活性イオンであるNd<sup>3+</sup>がほぼ均一ドーブされている。励起光19及び固体レーザ光20の波長に対して、固体レーザ結晶11の励起面17には無反射コーティングが、冷却面18には高反射コーティングが施されている。半導体レーザ16から出力された波長880nmの励起光19は、厚さ2mmの固体レーザ結晶11中を1往復することにより90%のエネルギーが固体レーザ結晶中に吸収される。

【0005】次に、従来の固体レーザ結晶を作成する方法について、ネオジウム:YAG(Nd:YAG)結晶の場合を例にあげて説明する。

【0006】図25は、従来の固体レーザ結晶の作成方法を説明するための図であり、引き上げ法による結晶の育成炉を示してある。引き上げ法では、まずIr製のつば29の中に、Nd:YAGの原料となるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及びNd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の高純度の粉末を入れ、誘導加熱用コイル31により、粉末を溶かし、Nd:YAG溶液31を生成させ、アルミナ棒32の先端に保持した、YAG種結晶26をNd:YAG溶液31の中につけ、ゆっくり回転させながら引き上げる。

40 【0007】レーザ活性イオンと母材の結晶には、物質固有の偏析係数が存在する。偏析係数が1の場合、結晶の軸方向にそった濃度分布は生じないが、NdのYAGに対する偏析係数は1以下であり、活性イオン濃度は引き上げるにつれて薄くなるような分布を持つ。このため従来の育成方法では、出来る限り結晶の軸方向に濃度が均一になるように、回転速度及び引き上げ速度をそれぞれ、毎分20回、毎時1mm程度に設定し、軸方向に沿って均一な濃度を持つ固体レーザ結晶を育成していた。その後、所望の大きさに切断し、研磨後に無反射、高反射コーティングを施し、固体レーザ結晶を作成してい

た。

【0008】次に従来の固体レーザー装置の動作について、図24を参照して説明する。

【0009】半導体レーザー16より出力した励起光19は、集光光学系13を通して、固体レーザー結晶に入力する。励起光19は、固体レーザー結晶11の冷却面18で折り返されることにより、ほぼ、90%以上のエネルギーが固体レーザー結晶11に吸収される。固体レーザー結晶11に吸収された光の一部は熱に変換され、一部が波長1064nmの固体レーザー光20として、出力鏡14より出力される。

【0010】前述のアクティブミラー方式では、理想的には、結晶内の温度分布が厚み方向に一次元に分布するために、レーザー発振の光軸と温度勾配ベクトルが平行となり、熱レンズ効果が抑制される。更に、発熱位置と冷却面の距離が短くとれるために、効率的な冷却が可能となる。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】問題点は、レーザー結晶及び励起光の大きさが有限であるために、結晶表面の励起光の集光部をピークとして楕円状に温度勾配が生じるために、前述した熱レンズの抑制効果が減少してしまう。更に、従来のレーザー結晶では、母材にドーブされるレーザー活性イオン濃度が一定であるために、励起光の大部分が、レーザー結晶表面で吸収されてしまい、レーザー結晶表面の温度が上昇しやすいという欠点がある。

【0012】図26は、結晶の厚みを4mm、活性イオン濃度を1.4atm%とし、励起光の99%が結晶中に吸収されるように設定した固体レーザー結晶の、結晶中への励起光の吸収量22を示した図である。なお、吸収量は、結晶を厚み(4mm)方向に16分割したときの割合で表している。図26より明らかなように、結晶の励起面で大部分の励起光が吸収されることになる。この結果、結晶内の温度上昇は、固体レーザー結晶11の励起面17(横軸0の位置)で最も高くなる。

【0013】図27は、前述のアクティブミラー方式の固体レーザー結晶に10Wの励起光を入力したときの、上昇温度23の計算結果を示してある。図27中、励起面17から冷却面18までの距離をd、励起光が照射される結晶中心23から結晶側面までの距離をr、温度変化をTとした。なお、計算では、吸収された励起光19の約1/3のエネルギーが熱に変換されると仮定している。更に、計算では、固体レーザー結晶11の励起面17及び側面25からの冷却効果を考慮していないため、実際の温度上昇は、計算よりも低くなる。図27より明らかなように、固体レーザー励起面でもっとも温度が上昇することが判る。冷却面から離れるほど冷却効果は減少するために、このことは、大きなデメリットになる。ビームの品質に関しては、温度分布以外にも、結晶の熱的な形状変化や共振器のパラメータにも依存するが、この状

態では、ビームの高品質を維持しながら、更に高出力化を行うことが困難になる。

【0014】本発明の目的は、高出力化に伴う熱ひずみを抑制し、高品質なビームを取り出すことができる固体レーザー装置及びこれに用いる固体レーザー結晶の作成方法を提供することにある。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明の固体レーザー結晶は、レーザー活性イオンを有するディスク形状の固体レーザー結晶において、前記固体レーザー結晶の結晶軸方向に前記レーザー活性イオンのドーブ濃度分布が変化していることを特徴とする。

【0016】また本発明の固体レーザー結晶は、レーザー活性イオンを有するディスク形状の固体レーザー結晶において、前記固体レーザー結晶の励起面となる端面から冷却面となる端面に向かって前記レーザー活性イオンのドーブ濃度分布が連続的又は段階的に増加していることを特徴とする。

【0017】またドーブ濃度分布の段階的な変化がレーザー活性イオンのドーブ濃度が異なる複数個の結晶を接合により形成されいることを特徴とする。また固体レーザー結晶の励起面に固体レーザー光及び励起光に対して、光学的に透明な材質を接合したことを特徴とする。また濃度の異なる複数個の結晶がオプティカルコンタクトあるいは拡散接合により接合されていることを特徴とする。またレーザー活性イオンはNb又はYbであることを特徴とする。

【0018】材料溶液の攪拌による本発明の固体レーザー結晶の作成方法は、固体レーザー結晶の材料粉末を加熱し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げる固体レーザー結晶の作成方法であって、回転引き上げとともに材料溶液を攪拌手段により攪拌し、レーザー活性イオン濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする。

【0019】材料溶液の攪拌による本発明の固体レーザー結晶の製造装置は、固体レーザー結晶の材料粉末を加熱する手段を有し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げる固体レーザー結晶製造装置であって、材料溶液を攪拌する手段を備え、攪拌によりレーザー活性イオン濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする。

【0020】異なるイオン濃度のるつぼを用いた固体レーザー結晶の作成方法は、固体レーザー結晶の材料粉末を加熱し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げる固体レーザー結晶の作成方法であって、レーザー活性イオンの濃度の異なる複数個の材料溶液に対し、レーザー活性化イオン濃度の順に種結晶をつけ、レーザー活性イオン濃度を結晶軸方向に沿って勾配させることを特徴とする。

【0021】異なるイオン濃度のるつぼを用いた固体レ

ーザ結晶の製造装置は、固体レーザー結晶の材料粉末を加熱する手段を有し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げる固体レーザー結晶の製造装置であって、レーザー活性イオンの濃度の異なる複数個の材料溶液を有し、レーザー活性物質濃度の順に種結晶をつける手段を有することを特徴とする。

【0022】材料溶液のイオン濃度増加させる固体レーザー結晶の作成方法は、固体レーザー結晶の材料粉末を加熱し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げて固体レーザー結晶を作成する方法であって、前記材料溶液中のレーザー活性イオン濃度を時間とともに増加させ、レーザー活性イオン濃度を軸方向に沿って勾配させることを特徴とする。

【0023】材料溶液のイオン濃度増加させる固体レーザー結晶の製造装置は、固体レーザー結晶の材料粉末を加熱する手段を有し、材料粉末が溶融した材料溶液に固体種結晶を付け、回転させながら結晶を引き上げて固体レーザー結晶を作成する製造装置であって、前記材料溶液中のレーザー活性イオンを時間とともに増加させる手段を有し、レーザー活性イオン濃度を軸方向に沿って勾配させることを特徴とする。

【0024】レーザー活性イオン濃度が均一な固体レーザー結晶の周囲の一部を加熱手段により溶融し、前記加熱手段により固体レーザー結晶の軸方向に沿って一方から他方へ複数回移動させることにより、レーザー活性イオン濃度を結晶の軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザー結晶の作成方法。

【0025】レーザー活性イオン濃度が均一な固体レーザー結晶の周囲の一部を溶融するための加熱手段と、前記加熱手段と固体レーザー結晶との相対位置を固体レーザー結晶の結晶軸方向に沿って一方から他方へ移動させる手段を有し、前記加熱手段を固体レーザー結晶の周囲を溶融させ、かつ、一方から他方へ複数回移動させることにより、レーザー活性イオン濃度を結晶の軸方向に沿って勾配させることを特徴とする固体レーザー結晶の製造装置。

【0026】焼結体の加熱による固体レーザー結晶の作成方法は、溶融した固体レーザー溶液から結晶を成長させる固体種結晶に接合されレーザー活性イオン濃度が軸方向に勾配を持つ固体レーザー結晶材料の粉末焼結体の一部を加熱手段により部分的に溶融させて、レーザー活性イオン濃度が結晶の軸方向に沿って勾配させることを特徴とする。

【0027】焼結体の加熱による固体レーザー結晶の製造装置は、溶融した固体レーザー溶液から結晶を成長させるための固体種結晶が結合されレーザー活性イオン濃度が軸方向に勾配を持つレーザー結晶材料の粉末焼結体と、前記粉末焼結体の一部を溶融するための加熱手段と、前記粉末焼結体を前記加熱手段により部分的に溶融させて、レーザー活性イオン濃度が結晶の軸方向に沿って勾配した固体レーザー結晶を作成することを特徴とする。

【0028】本発明の固体レーザー装置は、励起光源としての半導体レーザーと、ディスク形状の固体レーザー結晶と、前記固体レーザー結晶の一方の端面である励起面より前記半導体レーザー光を入射して発生した光を共振させる共振器と、前記固体レーザー結晶の他方の端面である冷却面に冷却手段を備えた固体レーザー装置において、前記固体レーザー結晶内のレーザー活性イオンのドーピング濃度が、励起面から冷却面へ増加する勾配を有する固体レーザー結晶を用いたことを特徴とする。また励起面から冷却面までの厚さ方向の距離を1とした場合に、レーザー活性イオンの濃度が前記固体レーザー結晶の励起面となる端面から冷却面となる端面に向かって、距離の2乗に比例して増加する勾配を持つ固体レーザー結晶を用いたことを特徴とする。

【0029】本発明の固体レーザー装置は、励起光源としての半導体レーザーと、ディスク形状の固体レーザー結晶と、前記固体レーザー結晶の一方の端面である励起面より前記半導体レーザー光を入射して発生した光を共振させる共振器と、前記固体レーザー結晶の他方の端面である冷却面に冷却手段を備えた固体レーザー装置において、レーザー活性イオンのドーピング濃度が異なる複数個の結晶を前記ドーピング濃度が励起面から冷却面へ増加する勾配となるように接合した固体レーザー結晶を用い、前記ドーピング濃度の高い結晶面に前記冷却手段を接触させていることを特徴とする。

【0030】濃度の異なる複数個の結晶がオプティカルコンタクトあるいは拡散接合により接合されたことを特徴とする。

【0031】固体レーザー光及び励起光に対して、光学的に透明な材質を固体レーザー結晶の励起面に接合したことを特徴とする。

【0032】

【発明の実施の形態】本発明の固体レーザー結晶とその作成方法及び製造装置と固体レーザー結晶を用いた固体レーザー装置について図面を参照して詳細に説明する。

【0033】初めに本発明で用いる固体レーザー装置の構成について図面を参照して説明する。図1は、本発明の実施例で用いた固体レーザー装置の全体構成を示す図である。固体レーザー装置は、固体レーザー結晶11を励起するための半導体レーザー16、励起光19を固体レーザー結晶11に集光するための集光光学系13及び励起光反射鏡15、固体レーザー結晶11を冷却するヒートシンク12、固体レーザー光20を取り出すための出力鏡14を有している。固体レーザー結晶11の励起面17及び冷却面18には、それぞれ、励起光19及び固体レーザー光14の波長に対して無反射コート、及び高反射コートが施されている。

【0034】次に図1の固体レーザー装置の動作について説明する。半導体レーザー16より出力した励起光19は、集光光学系13より固体レーザー結晶11中に照射さ



れる。励起光19は、固体レーザ結晶11の冷却面18の高反射膜により折り返され、励起光反射鏡15へ入射する。励起光19は、励起光反射鏡15に折り返されることにより、再び、固体レーザ結晶11に入射する。これにより、励起光19の99%のエネルギーが固体レーザ結晶11に吸収される。固体レーザ結晶11に吸収された光は、一部は熱に変換され、一部が波長1064nmの固体レーザ光20として出力される。

【0035】次に本発明の固体レーザ結晶の第1の実施例について説明する。固体レーザ結晶の第1の実施例は、直径6mm、厚さ4mmであり、レーザ活性イオンの濃度が図2のように、厚さ方向に距離に比例して増加したNd:YAGの結晶である。本実施例では、励起面17、冷却面18でのレーザ活性イオン濃度は、それぞれ、0.1、1.3atm%である。この結晶による半導体レーザ光の波長は、880nm、出力10Wであり、本実施例の結晶中を2往復することにより99%のエネルギーが結晶中に吸収される。

【0036】次に本発明の固体レーザ結晶の第1の実施例を用いたときの効果について説明する。図3は、本発明の実施例における固体レーザ結晶11中に吸収された励起光19の割合を、励起面17から冷却面18の間で軸方向にプロットしたものである。なお、励起光吸収量22は、固体レーザ結晶11を厚み方向に16分割したときの割合で示してある。第1の実施例の結晶では、冷却面18側でレーザ活性イオンの濃度が高いために、冷却面18側で励起光の吸収が大きく、かつ発熱が大きくなるので冷却面での効率的な冷却が可能となる。

【0037】図4は、固体レーザ結晶の第1の実施例の結晶内の温度分布を計算した結果である。励起光の吸収量は冷却面の近くで大きくなるため、温度上昇のピークが冷却面側に移動するとともに、上昇値が26度以下に抑えられることが判る。なお、本計算においても、固体レーザ結晶11の励起面17及び側面25からの冷却効果を考慮していないために、実際には、更に温度上昇が抑制されることになる。

【0038】次に本発明の固体レーザ結晶の第2の実施例について説明する。固体レーザ結晶の第1の実施例で示したNd:YAGの場合、1atm%台後半の濃度以上に増加させると、上準位寿命の低下を生じるため、これ以上活性イオンの濃度を高くすることには限界がある。したがって層厚として4mmほどの厚さが必要となる。これに対し、固体レーザ結晶の第2の実施例であるイットリビウム:YAG(Yb:YAG)では、20atm%まで上準位寿命の低下を生じさせることなく、活性イオンのドーピングが可能である。

【0039】図5は、Nb:YAG結晶にかえてYb:YAG結晶を用いた場合の結晶中のレーザ活性イオンの濃度21分布を表したものである。Yb:YAGでは、Nd:YAGに比べて高濃度ドーピングが可能となるため、

厚さ1.5mmの結晶中を2往復することにより励起光の99%のエネルギーが吸収されることになる。

【0040】図6は、前述の固体レーザ結晶を用いた場合の上昇温度分布を表したものである。Yb:YAGでは層厚を薄くすることができるので、冷却面からのいっそうの冷却効果が得られ、上昇温度のピークは約24.7度に抑制されることになる。

【0041】なお、本発明の固体レーザ装置は、励起光19である半導体レーザ16をV字型に配置し、固体レーザ光20を固体レーザ結晶11に対して垂直に取り出す配置について述べたが、従来例と同様の構成をとっても温度上昇の抑制効果を得ることは可能である。

【0042】次に、本発明の固体レーザ結晶の作成方法と固体レーザ結晶の製造装置について図面を用いて詳細に述べる。

【0043】図7は本発明の固体レーザ結晶の製造装置である第1の実施例の構成図であり、従来の固体レーザ結晶の製造装置と異なるのは、Nd:YAG溶液31を強制的に攪拌するための攪拌用ハネ33を有する点である。攪拌用ハネ33は、回転するアルミナ棒32に保持されており、アルミナ棒32とともに回転することにより、Nd:YAG溶液を強制的に攪拌する。従来の作成方法では、出来る限り結晶の軸方向に濃度が均一になるように、回転速度及び引き上げ速度をそれぞれ、毎分20回、毎時1mm程度にゆっくり引き上げ、軸方向に沿って均一な濃度を持つ固体レーザ結晶を育成していた。本実施例においては、回転速度及び引き上げ速度を従来の固体レーザ結晶の作成方法と同様にし、攪拌手段によりNd:YAGの溶液を強制的に攪拌することで、NdのYAGに対する実効偏析係数を固有の偏析係数に近づけ、従来の育成方法に比べて急峻な濃度勾配を持つレーザ結晶の育成が可能となる。

【0044】本実施例においては、強制的な攪拌手段である攪拌用ハネをアルミナ棒32とともに回転させる方法について説明したが、別に駆動手段を設けて、強制的な攪拌を行うことも可能である。また本実施例では回転速度及び引き上げ速度を従来の固体レーザ結晶の作成方法より速くすることにより、例えば毎時1.5~2.5mm程度とすることで攪拌手段を用いずに急峻な濃度勾配を持つレーザ結晶の育成も可能である。

【0045】図8は、本発明による固体レーザ結晶の製造装置を用いて作成したときの、固体レーザ結晶中の活性イオン濃度34の分布を表したものである。結晶の長さは、相対値で表しており、相対長さ1が種結晶側38に相当する。濃度は、Nd:YAG溶液31中のレーザ活性イオン濃度に対する相対値で表している。図8より明らかなように、濃度勾配は種結晶側38へ行くにつれて急峻になる。結晶の濃度を相対濃度で表していることから明らかなように、Nd:YAG溶液31中のレーザ活性イオン濃度を変えることにより、自由な濃度勾配

を持つ固体レーザ結晶の作成が可能となる。また作成したNd:YAG結晶27の中から、勾配a35、勾配b36、勾配c37それぞれの部分を切り出すことにより、自由な濃度勾配を持つ固体レーザ結晶の作成が可能となる。

【0046】次に、本発明の固体レーザ結晶の作成方法及び製造装置の第2の実施例について述べる。

【0047】図9は固体レーザ結晶の製造装置の第2の実施例の構成図であり、レーザ活性イオン濃度の異なる4種類の溶液a40、溶液b41、溶液c42、溶液d43を含むIr製るつぼ29及び固体レーザ結晶を溶液a40～溶液d43へ順に移動するための結晶移動機構39を有する。レーザ活性イオン濃度は、溶液a40で最も高く、溶液d43へ行くにつれて低くなるように設定されている。

【0048】本実施例の固体レーザ結晶の作成方法では、まず、溶液a40において結晶を成長させる。所望の長さ達した時点で、結晶移動機構39によりNd:YAG結晶27を溶液b41に移動させ再び結晶を成長させる。これを、溶液d43まで繰り返す。これにより、結晶の長さ方向で勾配を持つ結晶の作成が可能となる。

【0049】図10は、本実施例の固体レーザ結晶の作成方法による固体レーザ結晶中のレーザ活性イオン濃度48の分布を表したものである。勾配a44、勾配b45、勾配c46、勾配d47は、それぞれ、溶液a40、溶液b41、溶液c42、溶液d43において作成した濃度勾配である。完全に直線的な、勾配を作るのは困難であるが、図10のような勾配を持つ固体レーザ結晶でも十分な温度上昇の抑制効果を得ることができる。また濃度の異なる溶液の種類を増やすことにより、より均一な濃度勾配を持つ結晶の作成が可能となる。

【0050】本実施例においては、固体レーザ結晶を移動させる方法について説明したが、溶液を移動させても、結晶の作成は可能である。

【0051】次に、本発明の固体レーザ結晶の作成方法及び製造装置の第3の実施例について述べる。

【0052】図11は固体レーザ結晶の製造装置の構成図であり、Nd:YAG溶液31中に、レーザ活性物質の原料となるNd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の粉末を注入するためのレーザ活性物質注入口49が設けられている。

【0053】本実施例による固体レーザ結晶の作成方法においては、まず、Ir製るつぼ29中に、レーザ活性物質の原料粉末であるNd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を除く、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の粉末のみを導入し、レーザ活性物質の含まないYAG結晶を成長させる。その後、時間とともにレーザ活性物質導入口49よりNd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末を注入する。この方法により、時間とともにNd:YAG溶液31中のレーザ活性イオン濃度を増加させることができ、レーザ活性物質の注入量と注入時間を変えることによ

り、種結晶側で濃度の低く、離れるほど高くなる濃度勾配を持つ結晶を成長させることが可能となる。

【0054】次に、本発明の固体レーザ結晶の作成方法及び製造装置の第4の実施例について述べる。

【0055】図12におけるレーザ結晶の製造装置では、均一な濃度を持つ固体レーザ結晶50を結晶の軸方向に沿って移動可能なヒータ50の間に保持されており、ヒータ50は、結晶の一部を熱し溶融帯を作りながら、左から右へ移動する。このような作業を繰り返すことにより、レーザ活性イオンであるNd<sup>3+</sup>は徐々に右側に移動することになる。

【0056】図13は、前述のレーザ結晶の作成方法を用いたときの、固体レーザ結晶中のレーザ活性イオン濃度の分布を表したものである。濃度は、初期のNd:YAG結晶51のレーザ活性イオンの濃度に対する相対値で表しており、初期の濃度は、曲線a52に相当する。ヒータ50の移動を繰り返し替えることにより、レーザ活性イオンの濃度分布は、曲線b53から曲線d55へ変化する。本作成方法では、初期に用いる結晶の濃度の違い、ヒータ50の移動回数により、更に急峻な濃度勾配を持つ結晶の作成方法が可能となる。

【0057】次に、本発明の固体レーザ結晶の作成方法及び製造装置の第5の実施例について述べる。

【0058】図14を参照すると、本発明の固体レーザ結晶の製造装置は、アルミナ棒56に保持された、YAG種結晶26及び、Nd:YAGの原料となるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、及びNd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の高純度の粉末を焼結させたNd:YAG焼結体58、Nd:YAG焼結体58の一部を加熱溶融させるための赤外線60を発生させるための赤外線発生装置59を有する。Nd:YAG焼結体58は、あらかじめ、レーザ活性イオンの原料となるNd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の濃度を軸方向に勾配を持つように作成してある。赤外線発生装置59は、Nd:YAG焼結体59の周りを回転するとともに上下に移動するための移動機構61を有する。

【0059】本作成方法においては、赤外線発生装置59は、Nd:YAG焼結体58の一部を加熱、溶融させながら、図面上のYAG種結晶26より下方向へ回転、移動する。これにより、YAG種結晶26側から、徐々にNd:YAG焼結体58の結晶かが始まり、Nd:YAG焼結体58中のレーザ活性イオンの濃度勾配に応じたレーザ活性イオンの濃度勾配を持つ固体レーザ結晶が作成される。本作成方法においては、Nd:YAG焼結体58中に含まれるレーザ活性イオンの濃度を変えることにより、自由な濃度勾配を持つ固体レーザ結晶の作成が可能となる。

【0060】次に本発明の固体レーザ結晶の第2の実施例について図面を参照して、詳細に説明する。

【0061】本実施例では、直径6mm、厚さ4mmのNd:YAG固体レーザ結晶に対して、図15のよう



に、励起面から冷却面までの厚さ方向の距離を 1 とした場合に距離の 2 乗に比例してレーザ活性イオンの濃度 62 を増加させている。励起面 17、冷却面 18 での活性イオン濃度は、それぞれ、0.2、1.4 at m% である。このような濃度分布を持つことにより、固体レーザ結晶中に吸収される励起光吸収量 63 は、図 16 に示すように直線的な濃度勾配を持つ結晶に比べて、更に冷却面側で大きくなることが判る。

【0062】図 17 は、10W の半導体レーザにより固体レーザ結晶を励起したときの上昇温度の計算結果を表したものである。固体レーザ結晶の図 2 の例に比べて、上昇温度のピークは、冷却面側に移動するとともに、ピーク値は 23.4 度と図 2 の直線的な濃度勾配を持つ場合に比べて、更に抑制することが可能となる。

【0063】次に、本発明のレーザ結晶の第 3 の実施例について図面を参照して詳細に説明する。

【0064】図 18 (a) は、本発明の固体レーザ結晶の側面図、図 18 (b) はレーザ活性イオンの濃度分布を表す。図 18 を参照すると、本発明の固体レーザ結晶は、レーザ活性イオン濃度の異なる 4 枚の結晶が接合されている。最も濃度の低い結晶 a 65 から濃度の低い順に接合されており、結晶 a 65 は、励起面 17 に結晶 d 68 は冷却面 18 に配置されている。

【0065】図 19 は、励起光の吸収量 69 を表したものであり、結晶 a 65 から結晶 d 68 へ行くにつれて吸収量が大きくなるようになっている。更に、結晶の分割数を増やせば、図 2 の実施例に近づくことになる。

【0066】図 20 は、10W の半導体レーザにより固体レーザ結晶を励起したときの上昇温度の計算結果を表したものである。上昇温度のピーク値は 28.3 度であり、図 2 の実施例と同様温度上昇の抑制効果が得られる。

【0067】次に、固体レーザ結晶の第 3 の実施例を作成する方法について述べる。

【0068】直径 6 mm、厚さ 1 mm、レーザ活性イオン濃度がそれぞれ、0.35、0.7、1.05、1.4 at m% であり、結晶軸の一致した 4 枚の結晶の両端を、 $\lambda/10$ 、平行度 1 秒に研磨したものを、オプティカルコンタクトにより接合する。これにより、接合面における光学的なロスのほとんど生じない固体レーザ結晶を作成することが可能となる。

【0069】本実施例では、オプティカルコンタクトによる結晶の作成方法のみを述べたが、拡散接合による作成も可能である。

【0070】次に、本発明の固体レーザ結晶の第 4 の実施例について図面を参照して詳細に説明する。

【0071】図 21 (a) は、本発明の固体レーザ結晶の側面図、図 21 (b) はレーザ活性イオンの濃度分布を表す。図 21 を参照すると、本発明の固体レーザ結晶は、レーザ活性イオンのドーピングされていない結晶 a 70

と濃度勾配が直線的な勾配を持つ結晶 b の 2 枚の結晶が接合されている。結晶 b の接合面は、濃度の低い面であり、もう一方の面は冷却面に配置されている。

【0072】図 22 は、励起光の吸収量の割合 73 を表したものであり、結晶 a 70 では、励起光の吸収は起こらず、結晶 b 74 にて励起光が吸収される。

【0073】図 23 は、10W の半導体レーザにより固体レーザ結晶を励起したときの上昇温度の計算結果を表したものである。上昇温度のピーク値は 25.8 であり、図 2 に示す実施例に比べて 0.2 の温度抑制効果が得られている。実際には、側面からの冷却効果が得られるため、側面の表面積が図 2 の実施例に比べて 2 倍である本実施例では、より温度の抑制効果が得られる。更に、結晶 a 70 では励起光の吸収が起こらないので結晶の厚みを増やしても、温度上昇の抑制効果が低減しないため、機械的なひずみに対する強度の上昇効果が得られる。また第 4 の実施例ではドーピング濃度が直線となっているがこれに限られるものではなく、固体レーザ結晶の第 1～第 3 の実施例で述べた固体レーザ結晶にも用いることができる。

【0074】なお固体レーザ結晶の第 2～第 4 の実施例にレーザ活性イオンとしては、Nb あるいは Yb 等を用いることができる。

【0075】

【発明の効果】本発明では、活性イオン濃度が励起面より冷却面で高い固体レーザ結晶を用いているために、効率的な冷却が可能になる。このため高出力化時の固体レーザ結晶内の温度上昇を抑制することができ、高出力化に伴う、ビーム品質の劣化を抑制することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明に用いた固体レーザ装置の全体構成を示す図である。

【図 2】本発明の固体レーザ結晶の第 1 の実施例である Nd : YAG 結晶内のレーザ活性イオンの濃度分布を示す図である。

【図 3】本発明の固体レーザ結晶の第 1 の実施例である Nd : YAG 結晶内の励起光の吸収量の割合を示す図である。

【図 4】本発明の固体レーザ結晶の第 1 の実施例である Nd : YAG 結晶内の上昇温度分布を示す図である。

【図 5】本発明の固体レーザ結晶の第 1 の実施例である Yb : YAG 結晶内のレーザ活性イオンの濃度分布を示す図である。

【図 6】本発明の固体レーザ結晶の第 1 の実施例である Yb : YAG 結晶内の上昇温度分布を示す図である。

【図 7】本発明の固体レーザ結晶の製造装置の第 1 の実施例を説明するための図である。

【図 8】本発明の固体レーザ結晶の作成方法の第 1 の実施例により作成した Nd : YAG 結晶内のレーザ活性イ

オン濃度を示す図である。

【図 9】本発明の固体レーザー結晶の製造装置の第 2 の実施例を説明するための図である。

【図 10】本発明の固体レーザー結晶の作成方法の第 2 の実施例により作成した Nd : YAG 結晶内のレーザー活性イオン濃度を示す図である。

【図 11】本発明の固体レーザー結晶の製造装置の第 3 の実施例を説明するための図である。

【図 12】本発明の固体レーザー結晶の製造装置の第 4 の実施例を説明するための図である。

【図 13】本発明の固体レーザー結晶の作成方法の第 4 の実施例により作成した Nd : YAG 結晶内のレーザー活性イオン濃度を示す図である。

【図 14】本発明の固体レーザー結晶の製造装置の第 5 の実施例を説明するための図である。

【図 15】本発明の固体レーザー結晶の第 2 の実施例である Nd : YAG 結晶内のレーザー活性イオンの濃度分布を示す図である。

【図 16】本発明の固体レーザー結晶の第 2 の実施例である Nd : YAG 結晶内の励起光の吸収量の割合を示す図である。

【図 17】本発明の固体レーザー結晶の第 2 の実施例である Nd : YAG 結晶内の上昇温度分布を示す図である。

【図 18】本発明の固体レーザー結晶の第 3 の実施例を説明するための図及びレーザー活性イオンの濃度分布を示す図である。

【図 19】本発明の固体レーザー結晶の第 3 の実施例である Nd : YAG 結晶内の励起光の吸収量の割合を示す図である。

【図 20】本発明の固体レーザー結晶の第 3 の実施例である Nd : YAG 結晶内の上昇温度分布を示す図である。

【図 21】本発明の固体レーザー結晶の第 4 の実施例を説明するための図、及びレーザー活性イオンの濃度分布を示す図である。

【図 22】本発明の固体レーザー結晶の第 4 の実施例である Nd : YAG 結晶内の励起光の吸収量の割合を示す図である。

【図 23】本発明の固体レーザー結晶の第 4 の実施例である Nd : YAG 結晶内の上昇温度分布を示す図である。

【図 24】従来の固体レーザー装置の全体構成を示す図である。

【図 25】従来の固体レーザー結晶の製造装置を説明するための図である。

【図 26】従来の固体レーザー装置の固体レーザー結晶内の励起光吸収量の割合を示す図である。

【図 27】従来の固体レーザー装置のレーザー結晶内の上昇温度分布を示す図である。

【符号の説明】

10 反射鏡

11 固体レーザー結晶

12 ヒートシンク

13 集光光学系

14 出力鏡

15 励起光反射鏡

16 半導体レーザー

17 励起面

18 冷却面

19 励起光

20 固体レーザー光

21 レーザ活性イオン濃度

22 励起光吸収量

23 結晶中心

24 上昇温度

25 結晶側面

26 YAG 種結晶

27 Nd : YAG 結晶

28 アルミナ断熱材

29 Ir 製るつぼ

30 誘導加熱用コイル

31 Nd : YAG 溶液

32 アルミナ棒

33 攪拌用ハネ

34 レーザ活性イオン濃度

35 勾配 a

36 勾配 b

37 勾配 c

38 種結晶側

39 結晶移動機構

40 溶液 a

41 溶液 b

42 溶液 c

43 溶液 d

44 勾配 a

45 勾配 b

46 勾配 c

47 勾配 d

48 レーザ活性イオン濃度

49 レーザ活性物質注入口

50 ヒータ

51 Nd : YAG 結晶

52 曲線 a

53 曲線 b

54 曲線 c

55 曲線 d

58 Nd : YAG 焼結体

59 赤外線発生装置

60 赤外線

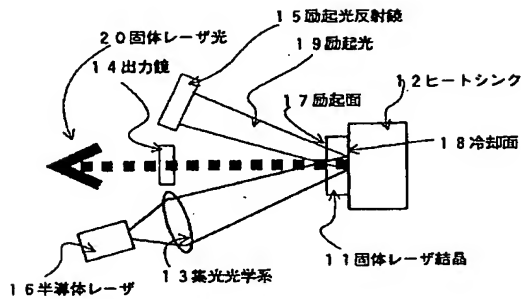
61 赤外線発生装置移動機構

62 レーザ活性イオン濃度

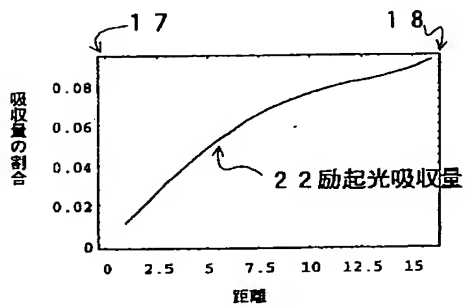
50 63 励起光吸収量

- 64 レーザ活性イオン濃度  
 65 結晶 a  
 66 結晶 b  
 67 結晶 c  
 68 結晶 d

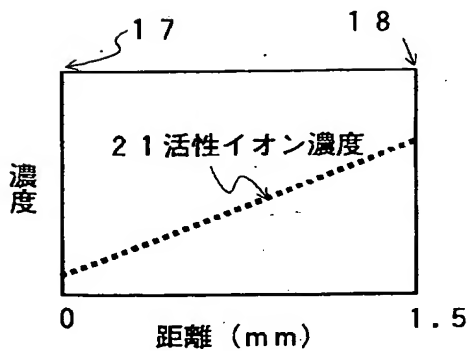
【図1】



【図3】

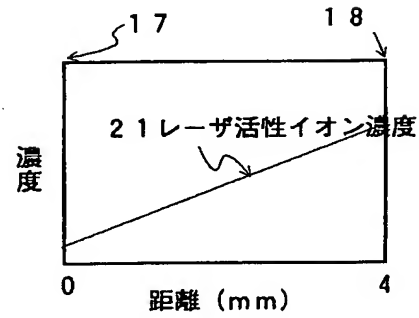


【図5】

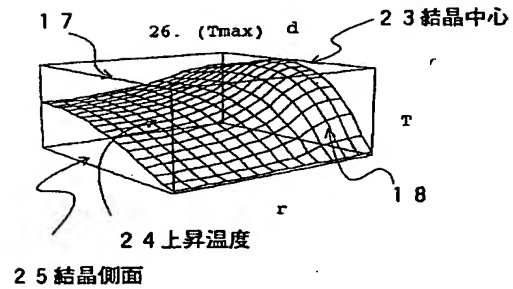


- 69 励起光吸収量  
 70 結晶 a  
 71 結晶 b  
 72 レーザ活性イオン濃度  
 73 励起光吸収量

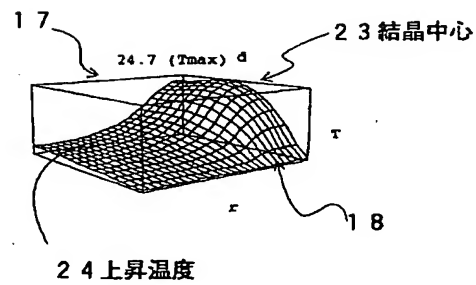
【図2】



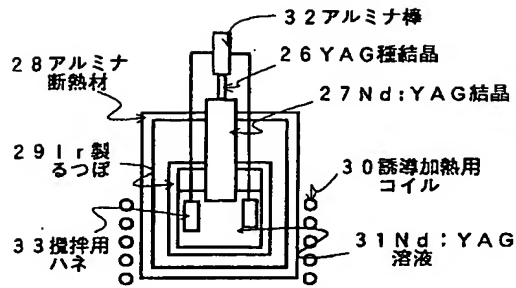
【図4】



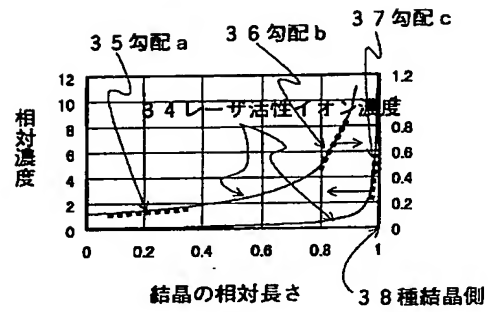
【図6】



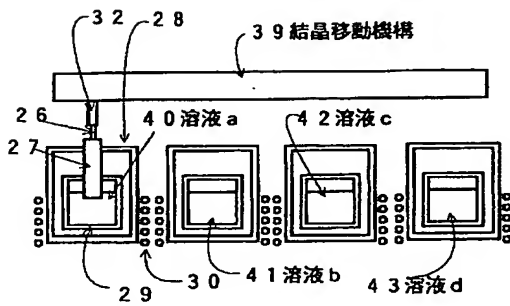
【図7】



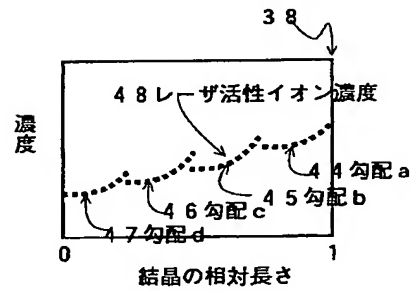
【図8】



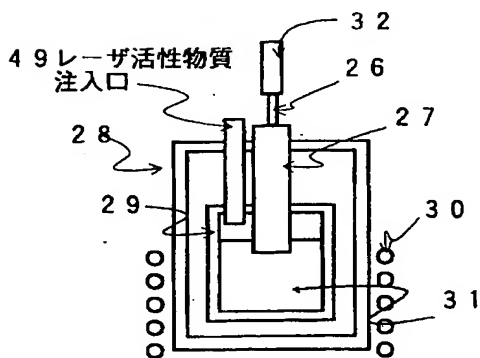
【図9】



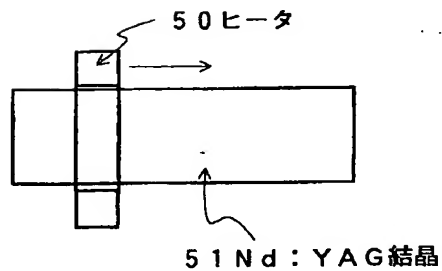
【図10】



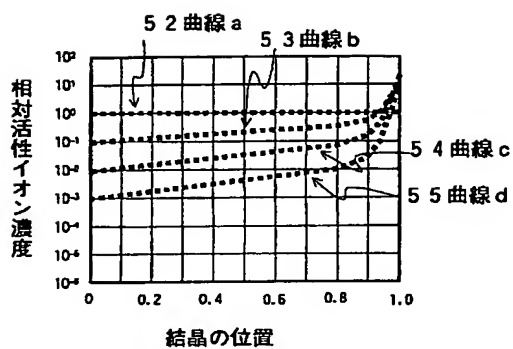
【図11】



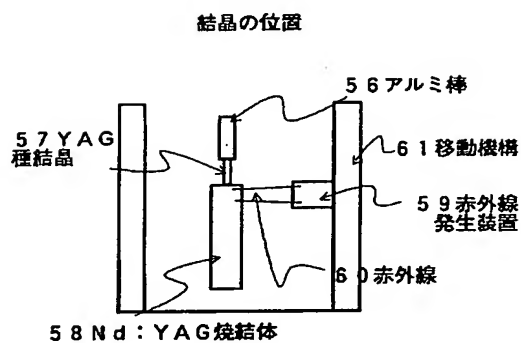
【図12】



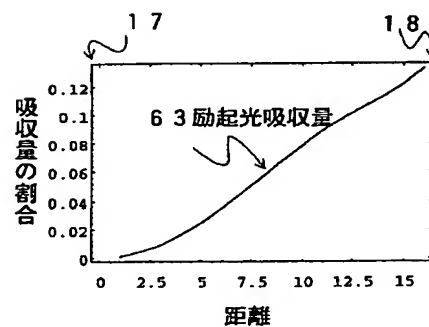
【図13】



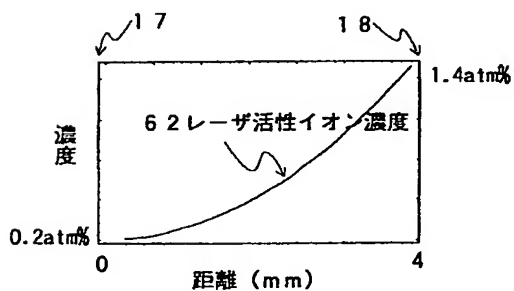
【図14】



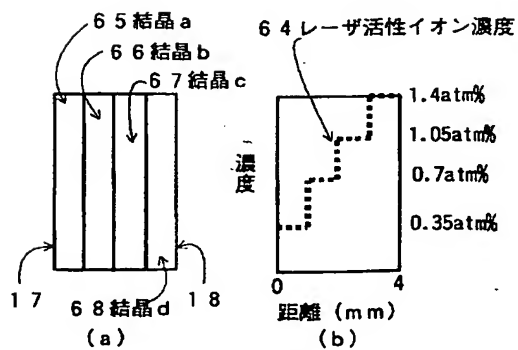
【図16】



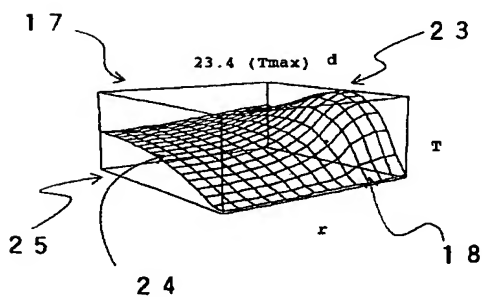
【図15】



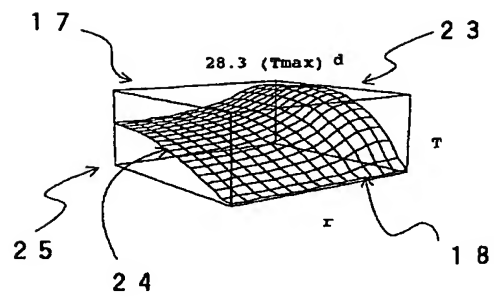
【図18】



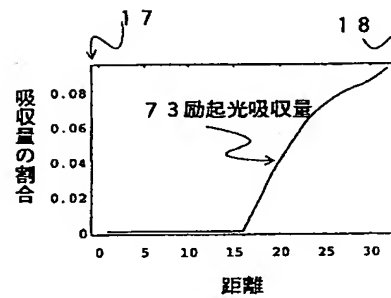
【図17】



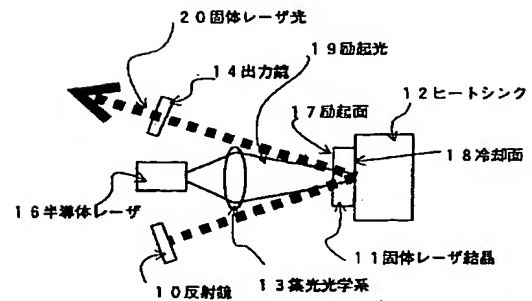
【図20】



【図 2 1】

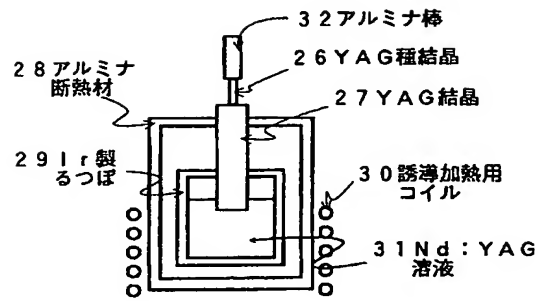


【図24】

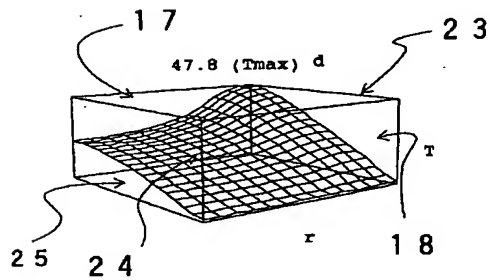




【図 2 5】



【図 2 7】



【図 2 6】

